

Permodelan dan Simulasi MPPT-Bidirectional Menggunakan Fuzzy Mamdani pada Sistem Energi Pembangkit Terdistribusi

Farid Dwi Murdianto¹, Dwi Lastomo², Soedibyo³, Ontoseno Penangsang⁴, Imam Robandi⁵

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
faridd124@gmail.com, dtomo23@gmail.com, sudibyo55@gmail.com, zenno_379@yahoo.com,
robandi@ee.its.ac.id

Abstrak

Sistem Photovoltaic (PV) banyak digunakan dalam berbagai aplikasi energy terbarukan. Masalah utama pada sistem PV adalah bagaimana cara memaksimalkan daya yang dihasilkan. Selain masalah tersebut kelebihan daya yang dihasilkan oleh PV pada suatu sistem distribusi juga perlu diperhatikan. Paper ini memanfaatkan kelebihan daya PV untuk penyimpanan energy menggunakan Bidirectional konverter. Setelah itu tegangan DC yang dihasilkan oleh PV dan penyimpan energy akan diubah menjadi tegangan AC menggunakan inverter menjubeban. Paper ini mengusulkan metode Fuzzy Mamdani dalam pengoptimalan pencarian titik daya maximum menggunakan SEPIC converter dengan efisiensi maximal 99.9%.

Kata kunci : photovoltaic, bidirectional konverter, sepic konverter, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Inverter, Fuzzy Mamdani

1. Pendahuluan

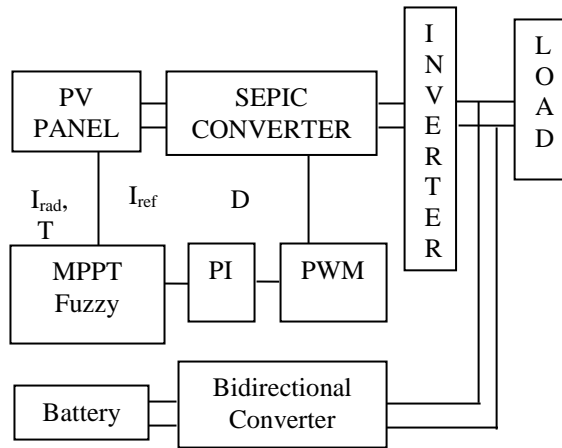
Kebutuhan energi yang tinggi menyebabkan ketersediaan bahan bakar fosil berkurang lebih cepat. Hal ini, menuntut riset pada bidang energi terbarukan sebagai pengganti bahan bakar fosil semakin mendesak. Penelitian pada bidang energi terbarukan berkembang pesat, terutama penelitian tentang Photovoltaic dan permodelannya (A. Labouret and M. Viloz. 2010, B. H. Khan. 2006, B. Hauke. 2011). Oleh karena itu, banyak studi tentang modul PV dan cara mengoptimalkan daya yang dihasilkan.

Pengoptimalan daya pada PV dikenal sebagai pelacakan titik daya maksimum (MPPT). Studi pada MPPT telah banyak dilakukan dengan berbagai metode seperti: algoritma hill climbing / P&O, incremental conductance, fractional open circuit voltage, short circuit fractional voltage control, the current sweep, load voltage maximization, and dP/dI feedback control telah dilakukan (E. Trishan and L. Patrick. 2007). Selain metode tersebut, ada metode lain yang digunakan untuk memaksimalkan PV MPPT menggunakan kecerdasan buatan, seperti: PSO, FireFly, ANFIS.

Saat ini, telah banyak dikembangkan metode untuk memaksimalkan output daya dari PV. Permasalahan yang muncul ketika PV terhubung ke sistem distribusi adalah bagaimana memanfaatkan kelebihan daya yang dihasilkan oleh PV. Kelebihan daya yang dihasilkan oleh PV penting untuk dipertimbangkan. Beberapa penelitian membahastentang hubungan paralel antara PV dan baterai yang digunakan sebagai penyimpan energy dimana masing-masing PV dan baterai terhubung

pada konverter (G. Roger, P. Juliano, H. Helio and I. Johnson. 2008), operasi Bidirectional Buck-Boost konverter dengan MPPT dalam sistem distribusi (W. Tsai-Fu, K. Chia-Ling, S. Kun-Han, C. Yung-Ruei, and L. Yih-Der, 2013), strategi dalam meningkatkan masa pakai baterai terhubung dengan PV telah dilakukan (D. Moumita and A. Vivek. 2013), penerapan AC-DC sistem mikro jaringan yang terhubung ke PV, penyimpanan energi, dan mempertimbangkan pengaruh dari beban kritis (M. Tan, S Brandy, and M. Osama, 2014), serta aplikasi dalam mobil listrik hybrid terhubung dengan PV dan penyimpanan energi telah dikembangkan (K. Deepesh and H. Niranjana. 2014).

Setelah banyak penelitian yang membahas hubungan PV dengan penelitian penyimpanan energi, muncul penelitian tentang penggabungan MPPT menggunakan P & O dengan konverter dua arah sebagai jembatan untuk baterai dan DC bus, tegangan yang dihasilkan oleh PV dan baterai diubah menjadi distribusi tegangan yang dikondisikan oleh inverter. Penelitian tersebut dilakukan dalam bentuk simulasi dan implementasi (P. Muoka, M. Haque, A. Gargoom, and M. Negnevitsky, 2013). Makalah ini mengusulkan studi MPPT kolektif menggunakan Fuzzy Mamdani, dengan Bidirectional converter sebagai jembatan untuk baterai dan DC bus, tegangan yang dihasilkan oleh PV dan baterai diubah menjadi AC dengan distribusi tegangan inverter ke beban. Subsistem dari MPPT-dua arah ditunjukkan pada Gambar. 1



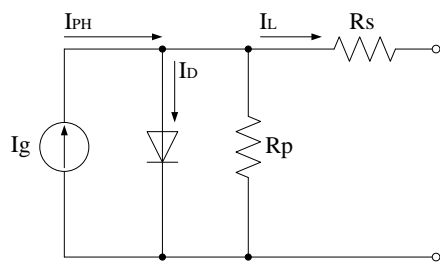
Gambar 1. Sistem MPPT-Bidirectional

2. Permodelan Modul PV

Modul PV terdiri dari multi sel yang menghasilkan tegangan DC ketika terkena cahaya matahari. Umumnya, modul PV dapat terdiri dari 36 sel atau 72 sel. Daya output dari modul PV dipengaruhi oleh iradiasi dan suhu. Semakin besar iradiasi, semakin besar daya output yang dihasilkan oleh modul PV dan sebaliknya. Dalam penelitian ini, 10 modul PV digunakan. Setiap modul PV mempunyai daya 200 W, yang dihubungkan secara seri sehingga total daya output 2000W ditunjukkan pada Tabel1.

Tabel 1. Spesifikasi Panel PV(BP Solar. 2007)

Parameter	Nilai
Maximum Power (P _{max})	200 W
Voltage @ P _{max} (V _{mp})	24.5 V
Current @ P _{max} (I _{mp})	8.16 A
Guranteed minimum P _{max}	182 W
Short-circuit Current (I _{sc})	8.7 A
Open-circuit Voltage (V _{oc})	30.8 V
Temperature coefficient of V _{oc}	-(111 ± 10) mV/°C
Temperature coefficient of I _{sc}	(0.065 ± 0.015)%/°C
NOCT2	47 ± 2°C



Gambar 2. Rangkaian ekivalen standar dari sel PV

Menggunakan rangkaian ekuivalen standar sel PV ditunjukkan pada Gambar 2, arus-tegangan (I-V) persamaan karakteristik dari string pparalel dengan sel sseriper string dikembangkan dari (1) ke (5) seperti di bawah ini[1].

$$I_L = I_{PH} - I_S \left[\exp \left(\frac{qV_d}{AK_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_{SH}} \quad (1)$$

$$I_{PH} = \left[I_{SC} + K_1 (T_C - T_{Ref}) \right] G \quad (2)$$

$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{Ref}} \right)^3 \exp \left[qE_B \left(\frac{1}{T_{Ref}} - \frac{1}{T_C} \right) / K_B A \right] \quad (3)$$

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{N_S K_B T_C} \right) - 1 \right]} \quad (4)$$

$$I_L = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[\exp \left(qV / N_S K_B T_C A \right) - 1 \right] \quad (5)$$

3. Permodelan Konverter dan Kontroller MPPT

3.1 Permodelan Sepic Konverter

Konverter SEPIC adalah pengembangan dari buck-boost konverter dengan fungsi yang sama yaitu menaikkan dan menurunkan tegangan. Perbedaannya adalah bahwa tegangan yang dihasilkan oleh konverter SEPIC positif. Dalam tulisan ini, konverter SEPIC digunakan sebagai MPPT untuk mengoptimalkan output daya pada modul PV. Persamaan (6) sampai (10) digunakan untuk pemodelan SEPIC dalam mode CCM (Continuous Conduction Mode) (D. W. Hart, 2011). Spesifikasidan desain SEPIC parameter ditunjukkan pada Tabel2.

$$V_o = V_{IN} \frac{D}{1-D} \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{V_{IN} \times D}{\Delta i_{L1} \times f_s} \quad (7)$$

$$L_2 = \frac{D}{\Delta i_{L2} \times f_s} \quad (8)$$

$$C_o = \frac{D}{R \times \frac{\Delta V_o}{V_o} \times f_s} \quad (9)$$

$$C_o = \frac{D}{R \times \frac{\Delta V_{C_s}}{V_o} \times f_s} \quad (10)$$

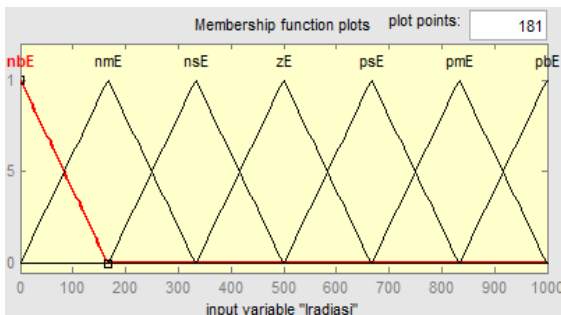
Frekuensi PWM yang digunakan adalah 40KHz bertujuan untuk meminimalkan nilai induktansi L1 dan L2. Dengan menggunakan frekuensi tinggi sinyal yang dihasilkan oleh output konverter SEPIC akan menjadi smooth. Keseluruhan perhitungan SEPIC converter hampir sama dengan perhitungan Buck-boost konverter.

Tabel 2. Spesifikasi Sepic dan Parameter Desain

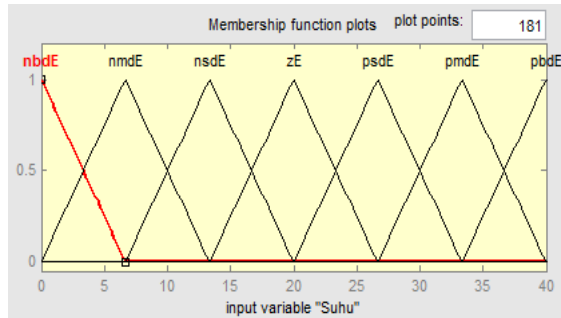
Parameter	Simbol	Nialai	Satuan
Tegangan Input	V_{in}	245	V
Frekuensi Switch	F_s	40	KHz
Tegangan Output	V_o	400	V
Daya Output Rerata	P_o	2000	W
Arus Ripple	ΔI_L	5%	A
Tegangan Ripple	ΔV_o	5%	V
Inductor 1	L_1	9.8	mH
Inductor 2	L_2	9.8	mH
Kapasitor Coupling	C_s	20	μ H
Kapasitor Output	C_o	20	μ H

3.2 Permodelan Kontroller MPPT

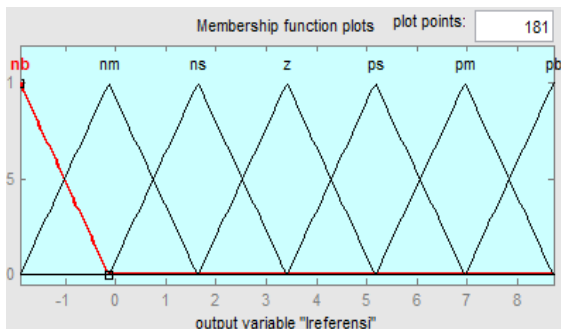
Blok diagram dari Fuzzy MPPT ditunjukkan pada Gambar. 1. Fungsi keanggotaan untuk input Fuzzy adalah iradiasi dan suhu. Output untuk Fuzzy adalah Ireferensi. Dalam makalah ini masing-masing fungsi keanggotaan terdiri dari 7 segitiga sehingga output yang dihasilkan lebih tepat dan akurat seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3-5. Hasil tampilan surface antara input dan output fungsi keanggotaan ditunjukkan pada Gambar 6. Fuzzy Mamdani adalah metode salah satu metode AI (*AritificialInteligent*) yang biasa digunakan untuk optimasi suatu sistem. Pada makalah ini Fuzzy Mamdani digunakan untuk mencari arus maksimal dari PV untuk dijadikan sebagai arus referensi. Arus referensi yang dihasilkan oleh Fuzzy dibandingkan dengan arus PV sehingga timbul error yang akan menjadi masukan PI. PI akan membandingkan arus referensi dengan arus PV sampai nilainya sama atau nilai error bernilai nol. Proses perbandingan dari arus referensi dan arus PV akan menghasilkan *duty cycle* yang akan diteruskan ke konverter. Setelah itu akan dihasilkan arus keluaran PV yang sesuai dengan arus referensi dari Fuzzy.



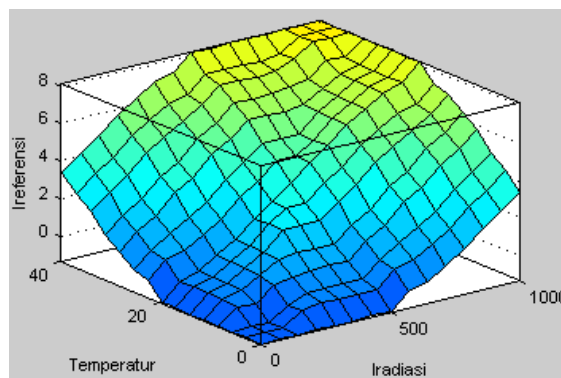
Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Iradiasi Fuzzy



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Suhu Fuzzy



Gambar 5. Output fungsi Keanggotaan Fuzzy



Gambar 6. Surface antara input dan output fungsi keanggotaan

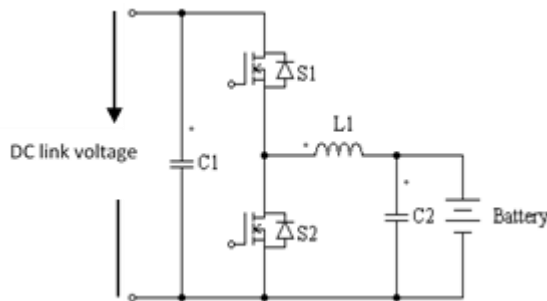
3.3. Permodelan Konverter Dua Arah

Konverter dua arah adalah konverter yang mampu menaikkan dan menurunkan tegangan di kedua arah. Pada saat Bidirectional konverter digunakan untuk *charging* pada penyimpan energi, Bidirectional konverter beroperasi pada mode buck atau menurunkan tegangan. Ketika digunakan untuk *discharging* penyimpan energi, Bidirectional konverter beroperasi pada mode meningkatkan atau menaikkan tegangan.

Dalam makalah ini Bidirectional konverter digunakan untuk menyimpan kelebihan daya yang dihasilkan oleh modul PV ke dalam penyimpan energi dan apabila daya pada PV kurang dari daya beban, penyimpan energi akan membantu memenuhi kebutuhan beban. Rangkaian Bidirectional konverter ditunjukkan pada Gambar. 7. Spesifikasi bidirectional konverter dan desain parameter dapat dilihat pada Tabel 3. Persamaan (11) ke (12) digunakan untuk memodelkan konverter dua arah di Continuous Conduction Mode (B. Hauke. 2010).

$$L = \frac{V_o(V_{DC}-V_o)}{\Delta I_L F_s V_{DC}} \quad (11)$$

$$C_{2(min)} = \frac{\Delta I_L}{8 F_s \Delta V_o} \quad (12)$$



Gambar 7. Konverter Bidirectional DC-DC

Tabel 3. Spesifikasi Konverter Dua Arah dan Parameter Desain

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
DC link Voltage	V_{DC}	400	V
Tegangan output baterai	V_o	240	V
Tegangan ripple output	ΔV_o	5%	V
Frekuensi switch	F_s	40	KHz
Arus Ripple Induktor	ΔI_L	5%	A
Induktor	L	6	mH
Kapasitor 1	$C1$	200	uF
Kapasitor 2	$C2$	200	uF

3.4. Permodelan Inverter

Sebuah fase inverter tunggal memiliki dua lengan dan pada setiap lengan terdiri dari dua switch (IGBT). Dengan menggunakan teknik modulasi lebar pulsa (PWM) tegangan pada dc bus dari 400VDC diubah menjadi 220VAC dengan mengatur modulasi indeks pada perhitungan inverter dengan pembatas tidak boleh lebih dari satu. Makalah ini menggunakan inverter satu phasa dengan frekuensi 50Hz, 220VAC. Hasil simulasi tegangan inverter saat variasi beban ditunjukkan pada Gambar 10. Spesifikasi dan desain parameter ditunjukkan pada Tabel 4. Persamaan (13) ke (15)

digunakan untuk nilai yang dihitung dari modulasi indeks (M. H. Rashid, 2004).

$$V_o = m_a \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

Persamaan (14) ke (15) digunakan untuk menghitung nilai dari filter LC

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_{res}} \quad (14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_{res} X_C} \quad (15)$$

Filter LC digunakan untuk harmonik filter, sehingga bentuk gelombang arus atau tegangan yang dihasilkan oleh inverter menjadi sinusoidal. LC filter adalah filter yang umum digunakan dalam inverter untuk mengurangi harmonisa.

Tabel 4. Spesifikasi Inverter Satu Fasadan Parameter Desain

Parameter	Symbol	Value	Unit
DC link Voltage	V_{DC}	400	V
Output voltage	V_{AC}	220	V
Frekuensi Switch	F_s	10	KHz
Filter Induktor	L	1.36	mH
Filter Kapasitor	C	6.37	uF

4. Analisis dan Hasil Simulasi

Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan 10 modul PV yang terhubung seri dengan daya output total 2000W pada tegangan 245V. Penyimpanan energi dengan menggunakan 20 baterai 12V 10Ah terhubung seri, sehingga daya maksimum yang dihasilkan 2400W dengan tegangan 240V. Daya pada saat beban penuh adalah 2000W.

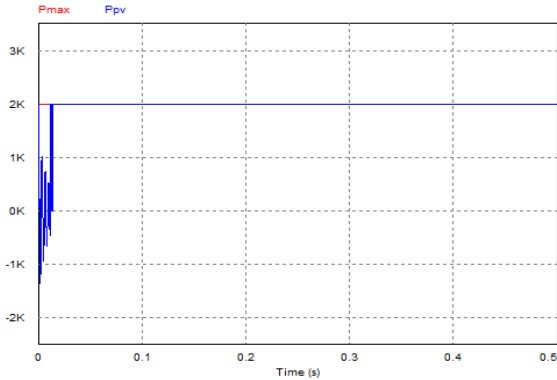
A. Maksimum Power Point Tracking

Untuk menguji metode Fuzzy dalam mencari titik daya maksimum dilakukan dengan cara mengubah data iradiasi secara variasi mulai dari 50W/m² sampai dengan 1000W/m² yang ditunjukkan pada Tabel 5. Selain itu, tes ini juga dilakukan dengan memvariasikan input data suhu seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6. Respond dari MPPT Fuzzy pada iradiasi 1000W/m² ditunjukkan pada Gambar. 10.

B. Charge dan Discharge pada penyimpan energi

Ketika daya pada modul PV lebih besar dari konsumsi daya beban, maka penyimpan energi dalam kondisi charge atau bidirectional converter beroperasi dalam mode buck. Bila daya PV kurang dari daya yang dikonsumsi oleh beban, maka penyimpan energi dalam kondisi discharge atau

beroperasi dalam mode boost. Pada simulasi ini SOC (State Of Charge) pada penyimpanan energy adalah 90% agar dapat terlihat proses *charge* dan *discharge* pada penyimpanan energy seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



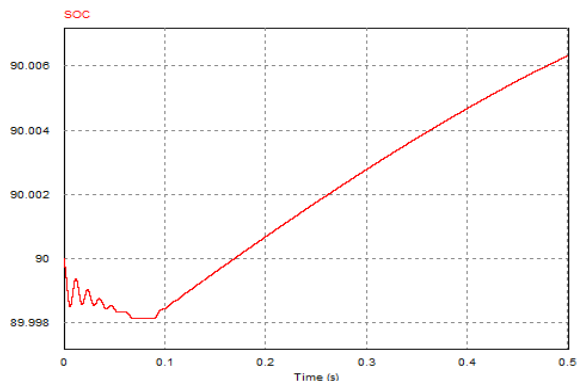
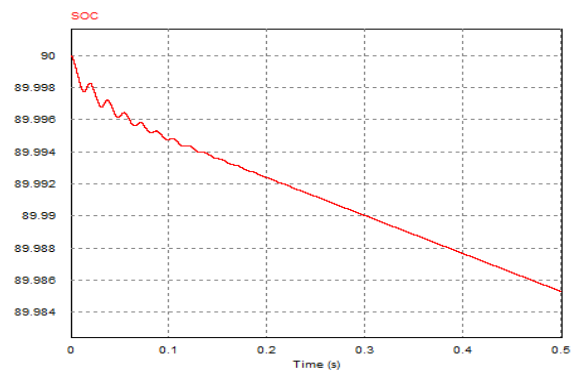
Gambar 8. Respon MPPT Fuzzy Mamdani

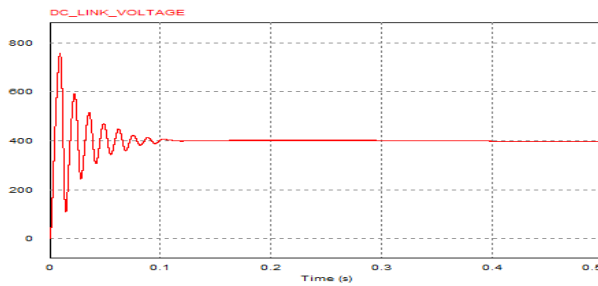
Tabel 5. Efek Variasi Iradiasi

S	Fuzzy	E Fuzzy	% fuzzy	Pmax
1000	1980	0.010	99.00	2000
950	1876	0.013	98.68	1901
900	1783	0.011	98.95	1802
850	1680	0.014	98.65	1703
800	1600	0.002	99.81	1603
750	1480	0.015	98.47	1503
700	1394	0.006	99.36	1403
650	1276	0.020	98.00	1302
600	1168	0.027	97.33	1200
550	1086	0.011	98.91	1098
500	986	0.011	98.90	997
450	878	0.019	98.10	895
400	784	0.011	98.87	793
350	672	0.026	97.39	690
300	577	0.019	98.13	588
250	474	0.025	97.53	486
200	370	0.039	96.10	385
150	261	0.081	91.90	284
100	181	0.022	97.84	185
50	87	0.022	97.75	89

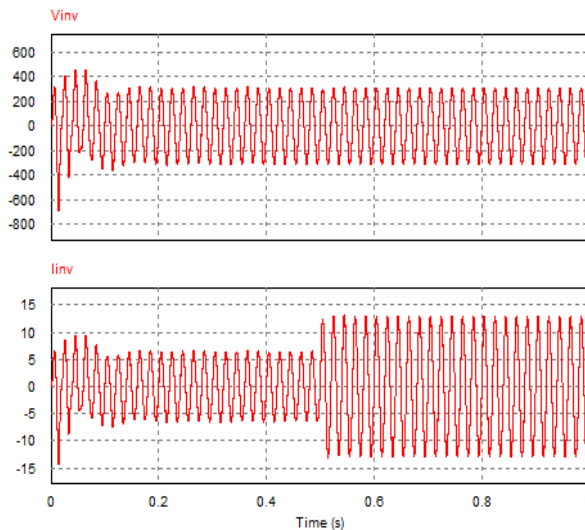
Tabel 6. Efek Variasi Suhu

T	Fuzzy	E Fuzzy	% Fuzzy	Pmax
40	1877	0.001	99.89	1879
39	1885	0.001	99.89	1887
38	1892	0.002	99.84	1895
37	1900	0.002	99.84	1903
36	1907	0.002	99.79	1911
35	1916	0.002	99.84	1919
34	1925	0.001	99.90	1927
33	1933	0.001	99.90	1935
32	1941	0.003	99.74	1946
31	1948	0.002	99.80	1952
30	1954	0.003	99.69	1960
29	1964	0.002	99.80	1968
28	1973	0.002	99.85	1976
27	1979	0.003	99.75	1984
26	1970	0.011	98.90	1992
25	1980	0.010	99.00	2000
24	2004	0.002	99.80	2008
23	2011	0.002	99.75	2016
22	2021	0.001	99.85	2024
21	2028	0.002	99.80	2032





Gambar. 9. Charge, Discharge penyimpanan energi dan tegangan bus DC



Gambar.10 Tegangan Inverter selama variasi beban

5.Kesimpulan dan Saran

Sistem MPPT-Bidirectional telah disimulasikan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi sistem berjalan dengan baik. Maksimum daya keluaran dari modul PV telah dicapai dengan Fuzzy mamdani dengan efisiensi yang sangat tinggi dan gelombang yang stabil pada variasi iradiasi dan suhu. Proses charge dan discharge pada penyimpanan energi berjalan dengan baik dan menghasilkan gelombang yang sesuai. Hasil keluaran tegangan pada bus DC juga mampu dipertahankan pada tegangan yang ditentukan. Tegangan pada Inverter terbukti mampu mempertahankan kestabilan tegangan output pada saat variasi beban.

Daftar Pustaka

A. Labouret and M. Villoz. (2010), *Solar Photovoltaic Energy*, London:IET,
 B. H. Khan.2006 ,“*Non conventional energy source*”, ed. 1New York: Tata Mc Graw Hills.
 B. Hauke. (2010), “*Basic Calculation of a Boost Konverter’s Power Stage*,”Texas Instruments, Dallas, Texas, Tech. Rep. SLVA372B, July 2010.

B. Hauke. (2011)“*Basic Calculation of a Buck Konverter’s Power Stage*,”Texas Instruments, Dallas, Texas, Tech. Rep. SLVA477, Dec. 2011
 BP Solar.(2007)“*SX3200 200 Watt Photovoltaic Module*”,
 D. Moumita and A. Vivek.(2013)“*A Novel Control Strategy for Stand-alone Solar Systems with Enhanced Battery Life*”, Third International Conference.,
 D. W . Hart, (2011),“*Power Electronics*”, New York: McGraw-Hill,
 E. Trishan and L. Patrick. (2007) “*Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*”, *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.22, no.2, June.
 G. Roger, P. Juliano, H. Helio and I. Johninon. (2008) “*A Maximum Power Point Tracking with Parallel Connection for PV Stand-Along Applications*,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 55, no.7, July.
 K. Deepeshand H.Niranjan. (2014)“*Bidirectional DC/DC Konverter System for Solar and Fuel Cell Powered Hybrid Electric Vehicle*,” International Conference,
 M. Tan, S Brandy, and M. Osama, (2014),“*Distributed Control of Hybrid AC-DC Microgrid with Solar energy, Energy Storage, and Critical Load*,” *IEEE*, 2014.
 M. H. Rashid, (2004), “*Power Electronics: Circuit, Devices, and Applications*,3rd ed”, New Jersey: Pearson education, Inc.,
 P. Muoka, M. Haque, A. Gargoom, and M. Negnevitsky, (2013), “*Modeling and Simulation of a Sepic Konverter Based Photovoltaic System with Battery Energy Storage*,” *IEEE*
 P. Muoka, M. Haque, A. Gargoom, and M. Negnevitsky, (2013),“*Modeling, Simulation and Hardware Implementation of a PV Power Plant in a Distributed Energy Generation System*,” *IEEE*.
 P. Muoka, M. Haque, A. Gargoom, and M. Negnevitsky, (2013),“*Modeling and Experimental Validation of a DSP Controlled Photovoltaic Power System with Battery Energy Storage*,” *IEEE*
 R.A. Messenger and J. Ventre,(2003), “*Photovoltaic Systems Engineering*”, 2nd Edition, Ney York: Wiley Interscience
 W. Tsai-Fu, K. Chia-Ling, S. Kun-Han, C. Yung-Ruei, and L. Yih-Der, (2013)“*Integration and Operation of a Single-Phase Bidirectional Inverter with Two Buck/Boost MPPTs for DC-Distribution Applications*,” *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 28, no.11, November